

УДК 523.34–3

## Спостереження нестационарної атмосфери Місяця та деякі її параметри

К.І. Чурюмов<sup>1</sup>, О.О. Бережний<sup>2</sup>, В.О. Пономаренко<sup>1</sup>, О.Р. Баранський<sup>1</sup>,  
Т.К. Чурюмова<sup>1</sup>, В.В. Клецонок<sup>1</sup>, А.М. Мозгова<sup>1</sup>, Н.С. Коваленко<sup>1</sup>,  
В.В. Шевченко<sup>2</sup>, Е.А. Козлова<sup>2</sup>, Ю.В. Пахомов<sup>3</sup>, Ю.І. Великодський<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Київський національний університет імені Тараса Шевченка

<sup>2</sup>Московський державний університет

<sup>3</sup>Інститут астрономії Російської академії наук

<sup>4</sup>Інститут астрономії Харківського національного університету

*Протягом максимуму метеорного потоку Персеїди 13 серпня 2009 року о 0–1<sup>h</sup> UT було виявлено швидке зростання яскравості ліній D1 та D2 Na. Таке явище пояснюється зіткненнями метеороїдів Персеїд з Місяцем. Загальна маса метеороїдів Персеїд, що бомбардували Місяць, близько 15 кг. Оцінюється верхня границя інтенсивностей ліній Si, Al, Ca, Fe, Ti, Ba, Li та Mn у місячній екзосфері.*

*НАБЛЮДЕНИЯ НЕСТАЦИОНАРНОЙ АТМОСФЕРЫ ЛУНЫ И НЕКОТОРЫЕ ЕЕ ПАРАМЕТРЫ, Чурюмов К.И., Бережной А.А., Пономаренко В.О., Баранский О.Р., Чурюмова Т.К., Клецонок В.В., Мозгова А.М., Коваленко Н.С., Шевченко В.В., Козлова Е.А., Пахомов Ю.В., Великодский Ю.И. — Во время максимума метеорного потока Персеиды 13 августа 2009 года в 0–1<sup>h</sup> UT был обнаружен быстрый рост яркости линий D1 и D2 Na. Это явление объясняется столкновениями метеороидов Персеид с Луной. Общая масса метеороидов Персеид, бомбардировавших Луну, около 15 кг. Также оценивается верхняя граница интенсивностей линий Si, Al, Ca, Fe, Ti, Ba, Li и Mn в лунной экзосфере.*

*OBSERVATIONS OF THE NONSTATIONARY ATMOSPHERE OF THE MOON AND SOME ITS PARAMETERS, by Churyumov K.I., Berezhny O.O., Ponomarenko V.O., Baransky O.R., Churyumova T.K., Kleshchenok V.V., Mozgova A.M., Kovalenko N.S., Shevchenko V.V., Kozlova E.A., Pakhomov Yu.V., Velikodsky Yu.I. — Quick increase of brightness of Na D1 and D2 lines in the lunar exosphere during maximum of Perseid 2009 meteor shower on August 13, 2009 at 0–1<sup>h</sup> UT is detected and explained by collisions of Perseid meteoroids with the Moon. Total mass of impacted Perseid meteoroids is about 15 kg. Upper limits of intensities of Si, Al, Ca, Fe, Ti, Ba, Li, and Mn lines in the lunar exosphere are estimated.*

**Ключевые слова:** Луна; атмосфера; состав; метеоры; процессы столкновений.

**Key words:** Moon; atmospheres; composition; meteors; impact processes.

### 1. ВСТУП

Елементи, виявлені в місячній екзосфері, потрапляють в неї у результаті взаємодій сонячних фотонів та сонячного вітру з місячним ґрунтом. Однак протягом основного метеорного потоку важливий внесок може здійснювати мікрометеоритне бомбардування, особливо на нічному боці Місяця, де ефекти, пов'язані з сонячними частинками, екрануються самим Місяцем. Після максимуму метеорного потоку Леоніди 1998 року була виявлена яскрава натрієва пляма місячної природи у антимисячному напрямку, але була відсутня в інший час [1]. Таким чином, метеороїдні зіткнення призводять до утворення атомів натрію, які в змозі залишити місячну екзосферу. Ці спостереження узгоджуються з оцінкою типової швидкості атомів Na у зовнішній частині місячної екзосфери протягом місячних затемнень, близькою до швидкості виходу з Місяця, 2.38 км/с [2]. Подальші спостереження екзосфери Місяця показують невелике зростання температури та щільності атомів Na протягом потоків Леоніди 1995 та 1997 років, але не представлені чіткі докази зростання температури та щільності місячного натрію протягом метеорних потоків Гемініди 1999 року та Квадрантиди 1999 року [3]. Порівнювалася активність метеорних потоків Леоніди 1997 та 1998 років, замість основних щорічних потоків, таких як Гемініди та Квадрантиди.

Якщо всі елементи надходять в екзосферу завдяки деякому ефективному механізму, тоді ми отримуємо пропорційність між щільністю атомів у місячній екзосфері та щільністю елементів у місячному ґрунті. Проте в результаті спектроскопічних спостережень місячної екзосфери із Землі не виявлено присутності Si, Al, Mg, Ca та Fe, яких найбільше в реголіті [4]. Більше того, ми виявили, що атоми цих тугоплавких елементів не надходять до екзосфери за допомогою деяких механізмів можливих для атомів лужних елементів Na та K. Низька температура конденсації Na- і K-вмісних сполук також свідчить про залишок цих елементів у газовій фазі. Варто зазначити, що Флінн і Штерн [4] спостерігали місячну

**Таблиця 1.** Параметри спектральних спостережень Місяця. Значення  $N_{\text{zen}}$  розраховані для передбачуваної температури 3000 К.

Час спостережень, UT	Частка освітлення, %	Відстань від поверхні, км	Позиційний кут, градуси	Інтенсивність лінії D2 Na, R	Інтенсивність лінії D1 Na, R	$N_{\text{zen}}(\text{Na})$ , $\text{cm}^{-2}$
Серп. 12, 23:13 – 23:43	58.8	90	18.9	$146 \pm 6$	$68 \pm 6$	$8.7 \cdot 10^8$
Серп. 12, 23:54 – Серп. 13, 0:24	58.5	270	18.8	$159 \pm 3$	$77 \pm 3$	$1.4 \cdot 10^9$
Серп. 13, 0:43 – 1:13	58.2	455	18.7	$137 \pm 3$	$64 \pm 3$	$1.6 \cdot 10^9$
Серп. 13, 23:22 – 23:52	48	90	15.2	$152 \pm 3$	$74 \pm 3$	$9.2 \cdot 10^8$
Серп. 13, 23:53 – Серп. 14, 0:23	47.7	270	15.1	$136 \pm 3$	$66 \pm 3$	$1.1 \cdot 10^9$
Серп. 14, 0:26 – 0:56	47.4	455	15.0	$89 \pm 3$	$45 \pm 3$	$9.5 \cdot 10^8$

екзосферу, шукаючи атоми металів, що потрапляли в неї завдяки десорбції, спричиненої фотонами, тому що ці спостереження були виконані протягом активності спорадичних метеорів і на сонячній стороні місячної поверхні. Теоретичне вивчення сонячного вітру як джерела місячної екзосфери показує, що поширеність всіх розглядуваних елементів, за виключенням Са, значно нижче за отриману верхню межу [5]. Сарантос та ін. [6] показують, що бомбардування метеороїдами є головним джерелом атомів Са, Si, Ti, Fe, Al, Mn та Mg у місячній екзосфері в полярних областях, оскільки метеороїдне бомбардування і спричинена фотонами десорбція відповідають за утворення 10 та 90% атомів Na відповідно у місячній екзосфері на полюсах.

Попереднє теоретичне вивчення атомів, що утворювалися на Місяці [7] в результаті зіткнень, дають змогу припустити, що зіткнення приводять до утворення лужних елементів в екзосфері лише у вигляді атомів. Однак, у результаті хімічних реакцій у яскравих метеорах під час зіткнень можуть утворюватися молекули металів [8, 9]. У роботі описуються спостереження місячної екзосфери, що сформувалася протягом метеорного потоку Персеїди 2009 року (розділ 2); в розділі 3 дано пояснення, ґрунтовані на хімічних процесах в хмарі, що утворилася в результаті зіткнень; висновки та подальша робота описані в розділі 4.

## 2. СПОСТЕРЕЖЕННЯ МІСЯЧНОЇ ЕКЗОСФЕРИ ТА ОБРОБКА ДАНИХ

Спектроскопічні спостереження резонансних ліній NaI D1 (5895.9Å) та D2 (5890.0Å) у місячній екзосфері проводилися протягом січня 2008 року – березня 2012 року з використанням спектрографа з ешелю MMCS (Multi Mode Cassegrain Spectrometer) на 2-му телескопі Цейсс (пік Терскол, спостережувальна станція Головної астрономічної обсерваторії України та Інституту астрономії Російської Академії наук, Кабардино-Балкарія, Росія). Щілина спектрографа має висоту 10'' та ширину 2''. Ми використали ПЗС матрицю розміром  $1245 \times 1152$  пікселів, отримали 31 спектральну смугу в області від 3720 до 7526Å. Роздільна здатність спектрографа  $R = 13\,500$ ; відношення сигнал–шум для отриманого спектра близько 50 для положення лінії D2 NaI. Найбільш успішними були спостереження, виконані 12/13 та 13/14 серпня 2009 року протягом максимуму метеорного потоку Персеїди (див. табл. 1). Було отримано шість ешелю спектрів для відстаней 50'', 150'' і 250'' (90, 270 та 455 км відповідно) від місячного лімба над північним полюсом, бомбардованим метеороїдами Персеїд. Час експозиції кожного спектра  $\tau_{\text{obs}}$  становив 1800 с.

Для обробки отриманих даних було використано програмне забезпечення комп'ютерної системи MIDAS з пакетом ешелю: видалення слідів космічних частинок, чіткість та виділення смуг ешелю, використання спектру-стандарту Fe–Ag лампи для калібрування за довжинами хвиль, використання зірки-стандарту HD214923 для калібрування потоку. У результаті опрацювання даних ми отримали спектр в абсолютних потоках. Цей спектр є поєднанням спектру місячної екзосфери та сонячного спектру, відбитого місячною поверхнею і розсіяного в атмосфері Землі. Для виділення спектру місячної екзосфери ми використовуємо сонячний спектр, взятий як спектр денного розсіяного світла.

Для віднімання сонячного спектру ми використовуємо сонячний спектр з високою роздільною здатністю, усереднений до спектральної роздільної здатності телескопу на Терсколі. Спектральна прозорість земної атмосфери для 600 нм була взята як 88% на 45 градусів відповідно [10]. Спостережувані параметри Місяця представлені в табл. 1: час спостережень, відстань спостережуваної області від поверхні місяця, позиційний кут спостережуваної точки щодо напрямку північного полюсу Місяця та інтенсивність резонансних ліній Na. Яскравість ліній Na на відстані 270 та 455 км від лімбу становить 109% та 93% порівняно з тією, що спостерігається для 90 км на 12/13 серпня 2009 року (див. рис. 1). Яскравість ліній Na на відстані 270 та 455 км від лімбу становить 89% та 58% порівняно з тією, що спостерігається для 90 км на 13/14 серпня 2009 року. Яскравість відбитого сонячного спектру на відстані 270 та 455 км від лімбу становить 75% та 54% порівняно з тією, що спостерігається для 90 км на 12/13 та 13/14 серпня 2009 року.

**Таблиця 2.** Результати спектроскопічного пошуку для інших елементів у місячній екзосфері на 12 серпня 2009 року о 23:54 — 13 серпня 2009 року о 0:24 UT. Фактор виснаження  $I_{\text{theor}}/I_{\text{obs}}$  — це відношення передбаченої теоретичної інтенсивності  $I_{\text{theor}}$  до верхніх меж інтенсивності емісії розглядуваних атомів на рівні 3 сигма. Значення  $g$ -факторів взяті з (а): Сарантос та ін. [6] чи (б): Флінн і Штерн [4]. Представлені дві моделі розрахунку теоретичних яскравостей і факторів виснаження: (с) —  $\tau_{\text{loss}}(X) = \tau_{\text{ion}}(X) \gg \tau_{\text{obs}}(X)$ , тільки  $\tau_{\text{ion}}(\text{Ca}) \sim 1,4 \cdot 10^4$ ,  $\tau_{\text{ion}}(\text{Al}) \sim 1500$  сек; (д) —  $\tau_{\text{loss}}(X) = \tau_{\text{bal}}(X)$  при 3000 К. В обох випадках для Na  $\tau_{\text{loss}} = \tau_{\text{ion}} \gg \tau_{\text{obs}}$ ,  $F_{\text{unc}}(X) = F(X) = 1$ .

Елемент	Довжина хвилі, Å	$g$ -фактор, фотони атом $^{-1}\text{с}^{-1}$	Надлишок у хмарі пару відносно Na	Спостережувана яскравість $I_{\text{obs}}$ , R	$N_{\text{zen}}$ , $\text{cm}^{-2}$	Теоретична яскравість $I_{\text{theor}}$ , $R^c$	Фактори виснаження	
							Модель с	Модель d
Na	5890	0.525a	1	80	$4.7 \cdot 10^8$	80	1	1
Si	3906	0.058b	60	< 16	$< 2.2 \cdot 10^6$	380	> 24	> 5.5
Al	3962	0.0364a	27	< 12	$< 2.1 \cdot 10^8$	70	> 6	> 4.5
Ca	4227	0.49a	1.1	< 11	$< 1.6 \cdot 10^7$	1500	> 140	> 28
Fe	3859	0.00457a	1.2	< 14	$< 6.6 \cdot 10^8$	0.8	> 0.05	> 0.01
Ti	5036	0.68b	0.017	< 13	$< 1.2 \cdot 10^7$	1.5	> 0.1	> 0.02
Ba	5536	11b	$3.2 \cdot 10^{-4}$	< 14	$< 7.4 \cdot 10^5$	0.15	> 0.01	> 0.001
Li	6708	16b	$1.6 \cdot 10^{-4}$	< 17	$< 1.9 \cdot 10^8$	5	> 0.25	> 0.12
Mn	4033	0.0109a	0.007	< 18	$< 3.3 \cdot 10^9$	0.015	$> 5 \cdot 10^{-4}$	$> 10^{-4}$

### 3. ОСОБЛИВОСТІ МІСЯЧНОЇ ЕКЗОСФЕРИ

Для оптично тонкої атмосфери стовпова густина  $N$  для даної висоти  $h$  над поверхнею Місяця обчислюється як

$$N(h) = 4 \cdot 10^6 \pi I / g, \quad (1)$$

де  $4\pi I$  — емісія атомів для розглядуваних елементів (у релєях) і  $g$  — фактор емісійного співвідношення у фотонах атом $^{-1}\text{с}^{-1}$  (див. табл. 2).

Припустимо, що властивості місячної екзосфери залишаються незмінними протягом декількох годин наших спостережень, температура і протяжність також залишаються сталими для спостережуваної області висот. Використовуючи ці припущення, основані на отриманих інтенсивностях ліній D1 і D2 Na та метод найменших квадратів, протяжність  $H$  атомів Na на 13/14 серпня оцінюється як  $700 \pm 200$  км для  $r^2 = 0.9$ . Температура атомів Na оцінюється як  $3100 \pm 800$  К з барометричної формули  $T = H A_r(\text{Na}) a / R$ , де атомна маса  $A_r(\text{Na}) = 0.023$  кг/моль,  $a = 1.62$  м/с $^2$  — гравітаційне прискорення на поверхні Місяця, і  $R = 8.31$  Дж·моль $^{-1}\text{К}^{-1}$  — газова стала. Для спостережень на 12/13 серпня коефіцієнт кореляції  $r^2$  між спостереженнями і теорією дуже малий, близько 0.1, і температура атомів Na оцінюється в області між  $-8000$  та  $7000$  К. Таким чином, температура атомів Na на 12/13 серпня не може бути оціненою, тому що протягом спостережень щільність атомів Na значно змінювалася.

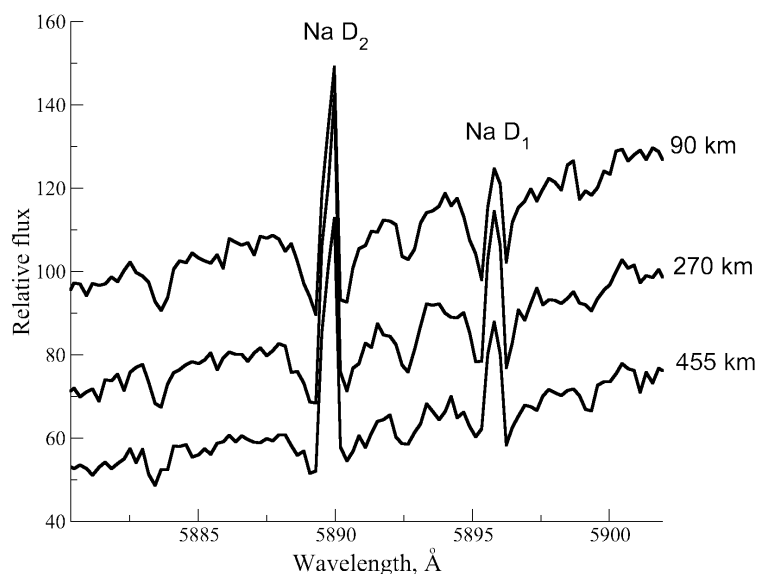
Тоді тангенціальна щільність  $N_{\text{tan}}$  оцінюється як

$$N_{\text{tan}} = N(h) / e^{-h/H}, \quad (2)$$

де  $h$  — відстань між нашою досліджуваною областю та місячним лімбом (див. табл. 1),  $H$  — протяжність місячної атмосфери. Щільність  $N_{\text{zen}}$  в зеніті обчислюється відповідно [11] як

$$N_{\text{zen}} = N_{\text{tan}} (2\pi R_{\text{moon}} / H)^{-0.5}, \quad (3)$$

де  $R_{\text{moon}} = 1738$  км — радіус Місяця. Якщо вважати, що отримане зростання зенітної щільності (див.



**Рис. 1.** Отриманий спектр ліній Na в місячній екзосфері на серпень 12,978 UT, 13,006 UT та 13,04 UT, 2009 року

табл. 1) на 12/13 серпня 2009 року може бути пояснене зіткненнями метеороїдів Персеїд, тоді щільність додаткових атомів Na, утворених в результаті зіткнень  $N_{\text{zenImp}}$ , оцінюється як

$$N_{\text{zenImp}} = N_{\text{zen}}(90 \text{ км}) - \frac{1}{2}(N_{\text{zen}}(270 \text{ км}) + N_{\text{zen}}(450 \text{ км})).$$

На 13 серпня 2009 року о 0-1 UT це значення становить близько  $8.7 \cdot 10^8$ ,  $4.7 \cdot 10^8$  і  $5.5 \cdot 10^8 \text{ см}^{-2}$  для температури, рівної 2000, 3000 та 4000 K, відповідно. Тоді визначена маса атомів Na  $M_{\text{ImpProd}}$ , утворених в результаті зіткнень, оцінюється як

$$M_{\text{ImpProd}} = N_{\text{zenImp}} S_{\text{bomb}} \text{Ar}(\text{Na}), \quad (4)$$

де  $S_{\text{bomb}} = 1.3 \cdot 10^{17} \text{ см}^2$  — площа місячної поверхні біля спостережуваної північної півсфери бомбардованої метеорним потоком Персеїди.  $S_{\text{bomb}}$  — значення, рівне площі на Місяці, утвореної двома великими колами сфери, чиї площини перпендикулярні до осей «центр Місяця — радіант Персеїд для часу спостережень» та «центр Місяця — точка спостереження», відповідно. Маса додаткових атомів Na, утворених внаслідок зіткнень, оцінюється як 2 кг.

Для оцінки маси метеороїдів, між якими відбулося зіткнення, нам необхідно знати вміст Na у мішені та імпакторі, а також співвідношення мас мішень-імпактор у хмарі, що утворилася в результаті зіткнення. Північний полюс Місяця, бомбардований Персеїдами, має дуже низький вміст Na-вмісних KREEP базальтів і габброніти, а їх середній елементний вміст у місячних породах майже такий самий, як на одному з екваторіальних високогірних районів [12]. З цієї причини елементний склад місячного ґрунту і метеороїдів Персеїд вважається таким же, як склад залізистих анортозитів і CI хондритів [13], відповідно, тобто 0,27 і 0,5% для Na. Співвідношення мас мішень-імпактор в гарячій хмарі, що утворилася в результаті зіткнень, припускається рівним 50 для випадку зіткнень метеорних тіл Персеїд зі швидкістю 59 км/с відповідно до [14].

Якщо припустити, що додаткові атоми Na (2 кг), що потрапили в місячну екзосферу між 12 серпня 2009 року 23:43 – 23:54 UT, залишені в екзосфері і що температура цих атомів дорівнює 3000 K протягом отримання другого та третього спектрів з 12/13 серпня, то маса метеороїдів, що бомбардують поверхню Місяця, оцінюється близько 15 кг. Якщо припустити, що час життя атомів Na рівний часу фотоіонізації Na,  $6.2 \cdot 10^4 \text{ с}$  [15], то верхня межа маси метеорного потоку Персеїди оцінюється в  $3.5 \cdot 10^{-18}$  і  $4 \cdot 10^{-18} \text{ г} \cdot \text{см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$  для часу, що охоплює 12 серпня 2009 року близько 7:00 – 23:43 UT, 13 серпня 2009 року близько 7:00 – 14 серпня 0:56 UT, відповідно.

Також було проведено пошук інших емісійних ліній, таких як Fe (3860Å), Si (3906Å), Al (3962Å), Ca (4227Å) і Ti (5036Å) в отриманому спектрі місячної екзосфери. Оцінюються верхні межі інтенсивностей очікуваних емісійних ліній. Рис. 3 демонструє невиявлення Ca. Процедура, описана в формулах (1)–(4), застосовується для аналізу емісійних ліній інших елементів. Передбачається, що температура атомів усіх розглянутих елементів становить 3000 K, тому що температура Na оцінюється як 3000 K, на 12/13 серпня, 2009.

Оцінимо теоретичні інтенсивності ліній атомів досі невиявлених елементів у місячній екзосфері. Відповідно до формули (2) [8], зенітна стовпова густина  $N_{\text{zen}}(X)$  атомів розглядуваного елемента X пропорційна  $N_{\text{zen}}(X) \sim \{X\} \tau_{\text{loss}}(X) f(X) F_{\text{unc}}(X) / m(X)$ , де  $\{X\}$  — масова частка елемента X в хмарі;  $\tau_{\text{loss}}(X)$  — час життя атомів X в екзосфері;  $F_{\text{unc}}(X)$  — частка несконденсованих частинок елемента X у газовій

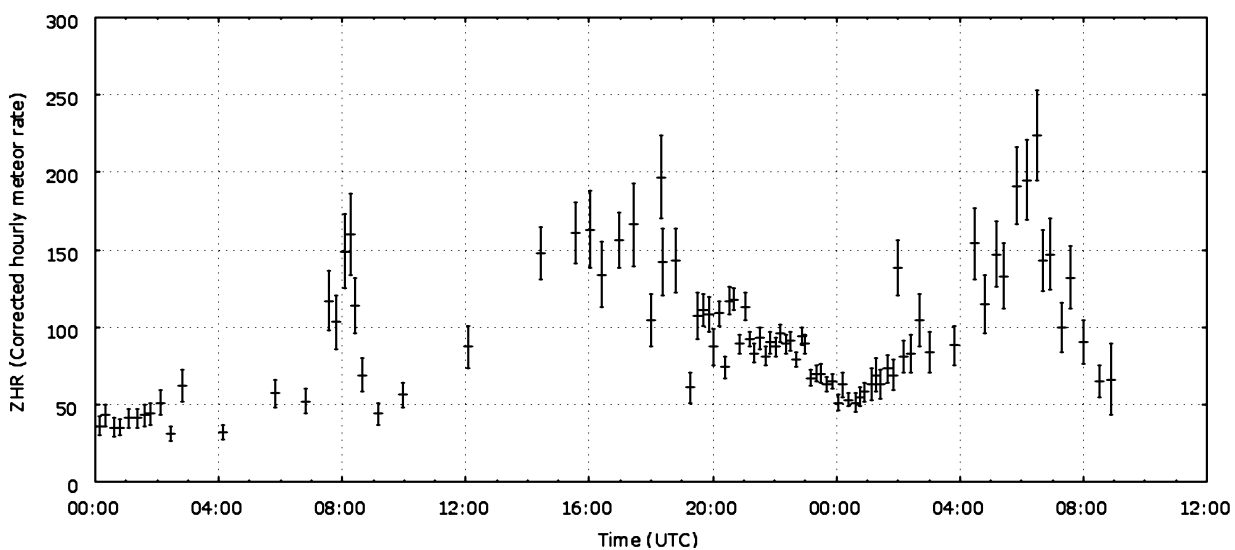


Рис. 2. Активність метеорного потоку Персеїд (12 серпня, 0 UT — 13 серпня, 12 UT 2009 року)

фазі і  $m(X)$  — маса атомів  $X$  в грамах. Множник  $f(X)$  є співвідношенням числа атомів елемента  $X$ , утвореного безпосередньо під час зіткнень і фотолізу, до загального числа  $X$ -вмісних частинок в газовій фазі хмари. Стехіометрична модель є справедливою, якщо  $F_{\text{unc}}(X) = F(X) = 1$  і  $\tau_{\text{loss}}(X) = \text{const}$ .

Для розрахунку теоретичних інтенсивностей ліній розглядуваних елементів необхідно знати елементний склад хмари, утвореної внаслідок зіткнень. Елементний склад хмари є сумішшю залізитих аноксидів і CI хондритів із співвідношенням мас мішеней-імпактор рівним: O — 50.5, Si — 22.4, Ca — 15.6, Al — 10.1, Fe — 0.54, Mg — 0.36, Na — 0.28, S — 0.12 за вагою %, C — 700, H — 400, Ti — 140, K — 80, N — 70, Mn — 45, Ba — 6.2, Li — 3 проміле. Якщо  $\tau_{\text{res}} \ll \tau_{\text{bal}}$  для атомів розглядуваних елементів  $X$ , тоді  $\tau_{\text{loss}}(X)$  визначається тривалістю іонізації  $\tau_{\text{ion}}(X)$ . Для Na  $\tau_{\text{ion}} \sim 6.2 \cdot 10^4$  [15], для Ca  $\sim 1.4 \cdot 10^4$  [16], для Al  $\tau_{\text{ion}} \sim 1500$  с, для інших основних тугоплавких елементів Ca, Mg, Ti, Fe та Si  $\tau_{\text{ion}} \gg \tau_{\text{obs}}$  [6]. Очікується, якщо  $\tau_{\text{loss}}(X) \gg \tau_{\text{obs}}(X)$ , тоді атоми цих елементів, що потрапили в місячну екзосферу після отримання першого спектру 12/13 серпня 2009 року, залишатимуться в ній протягом більш тривалого періоду, ніж час спостережень в ту ніч. Якщо  $\tau_{\text{res}} \gg \tau_{\text{bal}}$  для атомів розглядуваних елементів, то  $\tau_{\text{loss}}(X) = \tau_{\text{bal}}(X)$ . Користуючись цими припущеннями і тим, що  $F_{\text{unc}}(X) = F(X) = 1$ , оцінюються теоретичні яскравості ліній у випадку зіткнень Персеїд із загальною масою 15 кг і для найбільш чутливого другого спектру, отриманого 12/13 серпня 2009 року. Результати представлені в табл. 2.

#### 4. ОБГОВОРЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ

Інтенсивності сонячного вітру і сонячних рентгенівських променів 12/13 і 13/14 серпня 2009 року є порівнянними [17]. Всі ці значення містяться в звичайному діапазоні. Таким чином, ці дані ясно вказують на тихий період, так що ніякий сонячний вітер не може відповідати за спостережуване підвищення Na. Таким чином, сонячні спалахи не пояснюють значну різницю між двома групами спостережень.

Припустимо, що активність метеорного потоку Персеїди на Місяці була такою ж, як і на Землі в той самий час. Це дуже хороше наближення, тому що метеороїди Персеїд, маючи швидкість 59 км/с перетинають відстань між Землею і Місяцем приблизно за 100 хвилин. За даними ІМО [19] активність Персеїд 2009 року на Землі в одиницях ZHR складала 100 і 30 на 12 серпня 20 UT та 13 серпня 20 UT, відповідно (див. рис. 2). Максимум метеорного потоку Персеїди на Землі відбувся 12 серпня 2009 року о 8 і 18 UT та 13 серпня 2009 року о 6 UT. Таким чином, ми очікуємо збагачення вмісту атомів Na у місячній екзосфері 12/13 серпня 2009 року. Нарешті, в період проведених спостережень значно змінювалася лише інтенсивність мікрометеоритного бомбардування, інші джерела Na в місячній екзосфері (сонячний вітер і десорбція, спричинена фотонами) були майже постійними.

Для аналізу спектральної моделі спостережень використовувалися численні зіткнення метеороїдів. Отримана щільність атомів Na близько  $5 \cdot 10^8 \text{ см}^{-2}$  порівнюється зі звичайною щільністю атомів Na близько  $8 \cdot 10^8 \text{ см}^{-2}$ , як повідомили Поттер і Морган [20], і верхня межа стовпової густини атомів Na, що надходять в місячну екзосферу в результаті зіткнень спорадичних метеорних тіл, приблизно  $3 \cdot 10^8 \text{ см}^{-2}$ , як оцінили Сарантос та ін. [21]. Припускаючи, що метеороїди Персеїд викликали додаткову яскравість ліній Na бомбардованого Місяця протягом 15 хвилин (12 серпня 2009, 23:40 – 23:55 UT), масовий потік Персеїд оцінюється як  $10^{-16} \text{ г} \cdot \text{см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ . Це значення, ймовірно, є занадто високим для численних зіткнень невеликих метеороїдів і наші результати можуть бути краще пояснені одиничним зіткненням великого метеороїда відповідно до радіолокаційних спостережень [21]. Верхня межа масового потоку Персеїд  $3.5 \cdot 10^{-18} \text{ г} \cdot \text{см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$  12 серпня 2009 року між  $7^h$  та  $23^h 43^m$  порівнюється зі значенням  $2.8 \cdot 10^{-18} \text{ г} \cdot \text{см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ , отриманим [22]. Маса найбільших метеорних тіл Персеїд 2009 року, близько 15 кг, набагато вища, ніж маса одиничних метеороїдів Персеїд 2004 року, близько 12 г, в результаті чого виявлені оптичні спалахи на поверхні Місяця [24]. Додатковий пошук оптичних спалахів на Місяці, спричинених метеороїдами Персеїд потребує більш ретельної оцінки частоти появи масивних метеорних тіл Персеїд. Наша оцінка маси метеорного потоку Персеїд може бути завищена в три рази, тому що зіткнення може відбутися в регіонах, збагачених Na, додаткові похибки можуть з'являтися через погану точність оцінки співвідношення маси мішеней-імпактор в утвореній хмарі. З наших спостережень неможливо відрізнити одиничне зіткнення великого метеорного тіла від числа зіткнень малих метеороїдів. Щоб розрізнити ці дві моделі, для однієї слід збільшити часове розділення і проводити спектральні спостереження під різними позиційними кутами, що можливо з використанням великих 6–8-м телескопів. Спектральні спостереження з довгими щілинами (принаймні  $200''$ ) також корисні для одночасної оцінки температури атомів Na на різних висотах в один і той же час. Необхідні вдосконалені моделі місячної екзосфери для більш глибокого розуміння метеорних зіткнень як джерела місячної екзосфери.

Вміст атомів Ca, Si та Al в місячній екзосфері нижче, ніж на основі стехіометричної моделі. А саме, фактори виснаження є максимальними для другого спектра, отриманого 12/13 серпня 2009 року. Фактори виснаження Ca, Si та Al значно нижчі для першого спектра, тому що в цей час маса метеорного потоку Персеїд була меншою. Фактори виснаження тугоплавких елементів дещо нижчі для третього спектра, тому що в цьому випадку відстань від краю Місяця була більшою, порівняно з тією, що для другого спектра. Отримані фактори виснаження, утворених внаслідок зіткнень, атомів Ca і Si

порівнюються з оціненими Флінном і Штерном [4] для випадку надходження атомів тугоплавких елементів в екзосферу в результаті спричиненої фотонами десорбції і розсіянням сонячним вітром. Флінн і Штерн [4] оцінили фактори виснаження і для Fe і Ti, близько 30, в той час як чутливість вимірювань Al була порівнювалася з передбаченнями стехіометричної моделі. Для атомів Li наша отримана верхня межа порівнюється з яскравістю, оціненою теоретично. Тим не менш, для легких атомів Li використана проста стехіометрична модель, що ґрунтувалася на припущенні  $H < R_{\text{моон}}$ , є недоречною, тому що протяжність атомів Li в місячній атмосфері порівнюється з радіусом Місяця. Для інших елементів верхні межі розповсюдження є вищими, ніж ті, що ґрунтуються на основі стехіометричної моделі.

Передбачається, що виснаження атомів тугоплавких елементів, таких як Mg, Fe, Si, Al, Si в місячній екзосфері викликане конденсацією твердих частинок і утворенням повільно фотолізованих молекул [8]. Тим не менш, у даній статті не розглядається фотоліз гідроксидів та діоксидів, а також різні значення початкового тиску утвореної хмари.

Наші знання про джерела місячної екзосфери найближчим часом буде значно поліпшено, тому що оцінки чутливості космічного корабля LADEE, який буде запущено на місячну орбіту в 2013 році, показують, що більшість досі непомічених елементів, включаючи Al, Fe, Mg, Mn, Si, Ti, Ca можуть бути виявлені місією LADEE. Проте номінальна тривалість місії LADEE всього три місяці, і всі основні метеорні потоки не можуть бути вивчені. З цієї причини не вимагається додаткових наземних спостережень місячної екзосфери в період активності даних потоків.

## 5. ВИСНОВКИ

Виявлено збільшення яскравості лінії Na в місячній екзосфері. Загальна маса метеороїдів потоку Персеїд, що бомбардують, складає близько 15 кг. Оцінюються верхні межі інтенсивностей атомних ліній основних елементів.

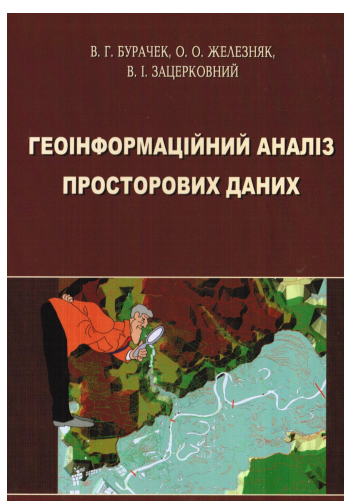
**Подяки:** Це дослідження було підтримано грантом ДФФД F40\_2-087 і РФФД 11-02-90440-Ukr\_f\_a.

1. Smith S.M., Wilson J. K., Baumgardner J., Mendillo M. Discovery of the distant lunar sodium tail and its enhancement following the Leonid meteor shower of 1998 // *Geophys. Res. Lett.* — 1999. — **26**. — P. 1649–1652.
2. Wilson J.K., Baumgardner J., Mendillo M.J. The outer limits of the lunar sodium exosphere // *Geophys. Res. Lett.* — 2003. — **30**. — doi:10.1029/2003GL017443.
3. Barbieri C., Benn C.R., Cremonese G., Verani S., Zin A. Meteor showers on the lunar atmosphere // *Earth, Moon, and Planets.* — 2001. — 85–86. — P. 479–486.
4. Flynn B.C., Stern S.A. A spectroscopic survey of metallic species abundances in the lunar atmosphere // *Icarus.* — 1996. — **124**. — P. 530–536.
5. Wurz P., Rohner U., Whitby J.A., Kolb C., Lammer H., Dobnikar P., Martín-Fernández J.A. The lunar exosphere: the sputtering contribution // *Icarus.* — 2007. — **191**. — P. 486–496.
6. Sarantos M., Killen R.M., Glenar D.A., Benna M., Stubbs T.J. Metallic species, oxygen and silicon in the lunar exosphere: Upper limits and prospects for LADEE measurements // *J. Geophys. Res.* — 2012. — **117**. — A03103, doi:10.1029/2011JA017044.
7. Bruno M., Cremonese G., Marchi S. Neutral sodium atoms release from the surfaces of the Moon and Mercury induced by meteoroid impacts // *Planet. Space Sci.* — 2007. — **55**. — P. 1494–1501.
8. Berezhnoy A.A. Meteoroid bombardment as a source of the lunar exosphere // *Advances in Space Research.* — 2010. — **45**. — P. 70–76.
9. Berezhnoy A.A., Churyumov K.I., Shevchenko V.V., Baransky O.R., Buchachenko A.A., Churyumova T.K., Kleshchenok V.V., Kozlova E.A., Ponomarenko V.O., Stolyarov A.V., Tvorun O.V. Behavior of Na atoms in the lunar exosphere during activity of meteor showers // *Astronomical School's Report.* — 2011. — **7**. — P. 185–189.
10. Tug H. Vertical extinction on La Silla // *ESO Messenger.* — 1977. — **11**. — P. 7–8.
11. Morgan Th.H., Killen R.M. A non-stoichiometric model of the composition of the atmospheres of Mercury and the Moon // *Planetary and Space Science.* — 1997. — **45**. — P. 81–94.
12. Berezhnoy A.A., Hasebe N., Kobayashi M., Michael G.G., Okudaira O., Yamashita N. A three end-member model for petrologic analysis of lunar prospector gamma-ray spectrometer data // *Planet. Space Sci.* — 2005. — **53**. — P. 1097–1108.
13. Lodders K., Fegley B. *The Planetary Scientist Companion.* — Oxford University Press, 1998. — P. 371.
14. Cintala M. Impact-induced thermal effects in the lunar and Mercurian regoliths // *JGR* — 1992. — **97**. — P. 947–973.
15. Huebner W.F., Keady J.J., Lyon S.P. Solar photo rates for planetary atmospheres and atmospheric pollutants // *Astrophys. Space Sci.* — 1992. — **195**. — P. 1–289, 291–294.
16. Killen R.M., Bida Th.A., Morgan Th.H. The calcium exosphere of Mercury // *Icarus.* — 2005. — 173. — P. 300–311.
17. Solar monitor. — 2009. — <http://www.solarmonitor.org>
18. OMNI. — 2009. — <http://omniweb.gsfc.nasa.gov>
19. IMO. — 2009. — <http://www.imo.net/live/perseids2009>

20. *Potter A.E., Morgan T.H.* Discovery of sodium and potassium vapor in the atmosphere of the Moon // *Science*. — 1988. — **241**. — P. 675–680.
21. *Sarantos M., Killen R.M., Sharma A.S., Slavin J.A.* Influence of plasma ions on source rates for the lunar exosphere during passage through the Earth's magnetosphere // *Geophys. Res. Lett.* — 2008. — **35**. — CiteID L04105.
22. *Pecinová D., Pecina P.* Radar meteors range distribution model. II. Shower flux density and mass distribution index // *Contributions of the Astronomical Observatory Skalnaté Pleso*. — 2007. — **37**. — P. 107–124.
23. *Hughes D., McBride N.* The mass of meteoroid streams // *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.* — 1989. — **240**. — P. 73–79.
24. *Yanagisawa M., Ohnishi K., Takamura Y., Masuda H., Sakai Y., Ida M., Adachi M., Ishida M.* The first confirmed Perseid lunar impact flash // *Icarus*. — 2006. — **182**. — P. 489–495.

Надійшла до редакції 7.09.2012

## НОВІ ВИДАННЯ



**Бурачек В.Г., Железняк О.О., Зацерковний В.І.** Геоінформаційний аналіз просторових даних: монографія. — Ніжин: ТОВ “Видавництво “Аспект-Поліграф”, 2011. — 440 с.

У монографії представлені засоби геоінформаційного аналізу просторових даних, розглянуті сучасні технології обробки геопросторової інформації, представлені погляди вітчизняних і закордонних фахівців на можливість сучасної аналітичної обробки в ГІС.

Викладені моделі й алгоритми, що лежать в основі геоінформаційного аналізу просторових даних. Розглянуті програмні засоби реалізації, інтеграції даних і технологій. Монографія містить графічні ілюстрації, що пояснюють роботу ГІС у процесі геоінформаційного аналізу просторових даних. Книга може бути корисною для науковців, керівників державних установ, викладачів вищої школи, аспірантів і студентів.

### Зміст

- |              |  |
|--------------|--|
| Розділ I.    | Загальні положення просторового аналізу даних              |
| Розділ II.   | Візуалізаційний аналіз у ГІС                               |
| Розділ III.  | Аналіз розподілу просторових об'єктів і атрибутивних даних |
| Розділ IV.   | Геоінформаційне картографування                            |
| Розділ V.    | Способи візуалізації поверхонь                             |
| Розділ VI.   | Джерела даних для побудови цифрових моделей рельєфу        |
| Розділ VII.  | Методи моделювання безперервних поверхонь у ГІС            |
| Розділ VIII. | Способи побудови цифрових моделей рельєфу                  |
| Розділ IX.   | Картометричні методи досліджень у ГІС                      |
| Розділ X.    | Просторовий аналіз за допомогою функцій вибору             |
| Розділ XI.   | Класифікаційний аналіз у ГІС                               |
| Розділ XII.  | Аналіз геоінформації за допомогою картографічної алгебри   |
| Розділ XIII. | Оверлейний аналіз у ГІС                                    |
| Розділ XIV.  | Буферний аналіз у ГІС                                      |
| Розділ XV.   | Мережевий аналіз у ГІС                                     |